

放射線帯電子の変動機構と宇宙天気予報への応用

小原隆博^(1,2) 古賀清一⁽²⁾ 松本晴久⁽²⁾ 五家建夫⁽²⁾

(1) NICT 電磁波計測研究センター (2) JAXA 総合技術研究本部

変動の概要

地球周辺の宇宙環境を構成する要素に、放射線環境がある。本稿では、特に、放射線電子に注目するが、静止軌道、中軌道、低軌道の衛星は、宇宙の放射線電子から強い影響を受け、深部帯電が進行した結果、永久故障に陥った衛星も多く存在する。

ここでいう放射線電子とは、数百 eV 以上、通常は、MeV のエネルギーを持った電子群をいう。このエネルギー帯では、電子は相対論的な運動を行うことから、別名、相対論的電子とも呼ばれている。MeV 電子の分布は、非常に偏っていて、地球半径 3 倍から 8 倍程度に及ぶ。この領域は、放射線帯外帯と、一般的には呼ばれている。

図 1 に、つばさ (MDS-1) 衛星が観測した、400keV 電子の分布を示す。

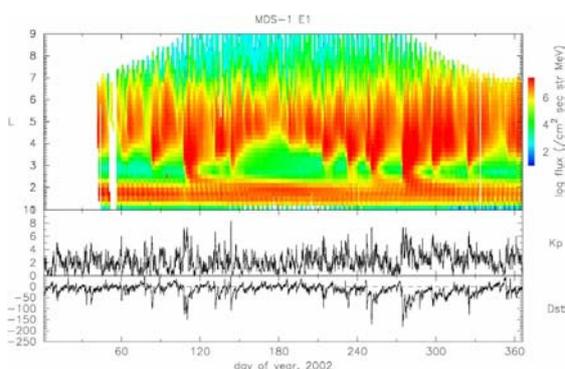


図 1、つばさ衛星が観測した 400keV 電子。縦軸は、 L 値。横軸は、2002 年のトータル日を示す。中央のパネル、下のパネルは、それぞれ、 Kp 指数、 Dst 指数である。

L が 2 付近にある電子は、放射線帯内帯電子で、 L が 3 付近には、電子の存在しない領域（スロットと呼ばれている）がある。 L が 3.5 から 7 あたりまでが、放射線帯の外帯で、図からも明らかなように、非常に激しく変動する。 Dst データと比較した結果、外帯電子は、磁気嵐が発生すると、非常に減少し、磁気嵐の回復相で、大きく増加する。トータル日 105 と 275 の磁気嵐では、回復相に増加した電子が、スロットから内帯に向けて、拡散していく姿が見てとれる。拡散は同時に、外側に向かっても起こっているようで、つばさ衛星の観測から、拡散の時定数を求める研究が行われている。

時間の経過とともに、電子で埋められたスロット領域では、電子の消滅が続き、スロットが、次第にその姿を明らかにしている。電子の消失の時定数は、 $L=3$ で、1.5 日程度である (小原、中村, 2004, Space Radiation)。

再形成過程

放射線帯外帯の再形成プロセスについては、Obara et al. (2000, 2001, EPS) が提案している、2 段加速説が確からしい。外帯電子が消失する過程は、発達した磁気圏対流と、磁場変形による電子の流れ出しであろうと考えている。磁気嵐の発達による断熱的な減少も、 L が小さいところでは利いてくる

(Obara et al., 2007, Space Radiation)。これらは、磁気嵐の主相において、最も顕著に見られるが、MeV 電子の消失とともに、尾部からフレッシュな電子が供給される。この種の電子（ソース電子）のエネルギーは、概ね 30-100keV であり、これが、磁気嵐回復相で、その場で加速・過熱されるといのが、2 段加速説の主張である。

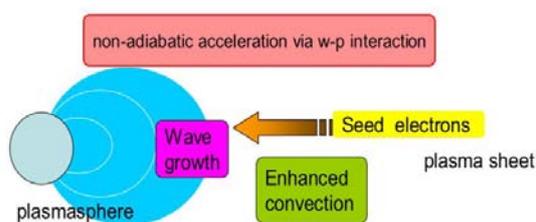


図 2、2 段加速説の説明。プラズマシートから補給された種電子が、その場加速を受ける様子が示されている。

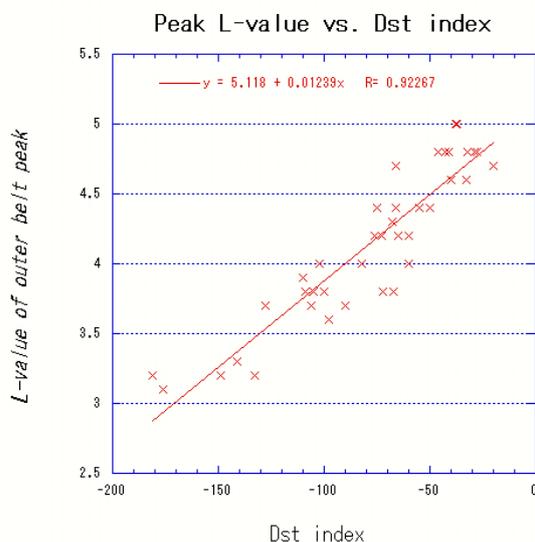


図 3、つばさが観測した再形成外帯の位置と、Dst 指数との関係。大きな磁気嵐では、地球に近い領域に、外帯は再形成される。

Dst 指数が -100nT の時は、外帯は、L=4 に、Dst 指数が -200nT では、L=3 付近に出来る事が、図 3 から明らかである。

あけぼの衛星が観測した低周波プラズマ波動の分布を、同じように、縦軸 L、横軸 Dst 指数で示したものが、図 4 である。

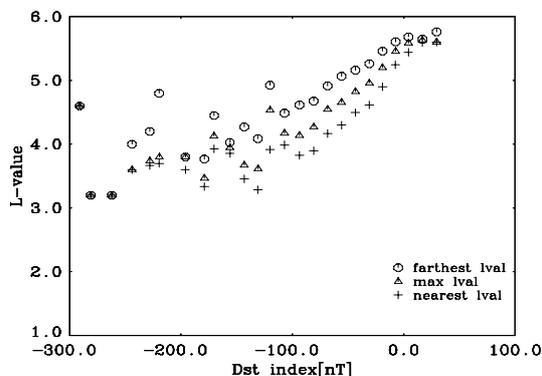


図 4、あけぼのが観測した低周波プラズマ波動。

図 3 と図 4 を詳細に比較すると、非常に良い一致が見られる。これらの観測事実は、2 段加速説を支持している。

予報への手がかり

静止軌道の放射線電子予報は、太陽風速度などを入力として、JAXA/NiCT で、実施されている(詳しくは、古賀他の報告を参照)。以下では、外帯全帯の全電子数を予測する手法を述べる。

この磁気嵐に対して、増加終了後における、L=4 から 6.8 までの電子の総数を求めて、そのときの、太陽風速度の積分値(図 5、最上パネル)、Dst 指数の積分値(図 5、中央パネル)、Ap 指数の積分地(図 5、最下パネル)と比較した。その結果、磁気嵐回復相の磁気嵐の積分が、最も強い相関を示すことが明らかになった。

このことは、放射線外帯電子の増加が、磁気活動に代表される、宇宙環境の活動レベルによって決まることを示す。まったく

静かな回復相では、電子は増加しないとす
る、これまでの研究と一致する。

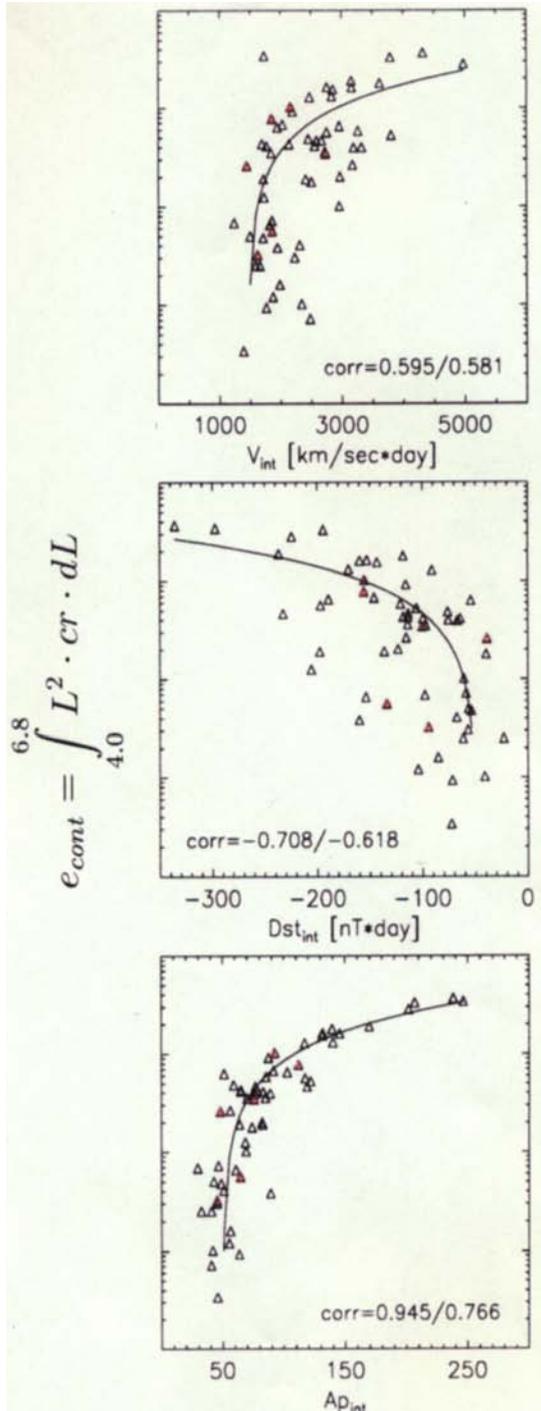


図5、外帯総電子数と、各パラメータ積分
値との比較。磁気活動指数が、最も強い相
関を示す。

数値予報へ向かって

NICTでは、スーパーコンピュータを用
いて、磁気圏のリアルタイムシミュレー
ションを、宇宙天気予報業務の一貫として行
っている。

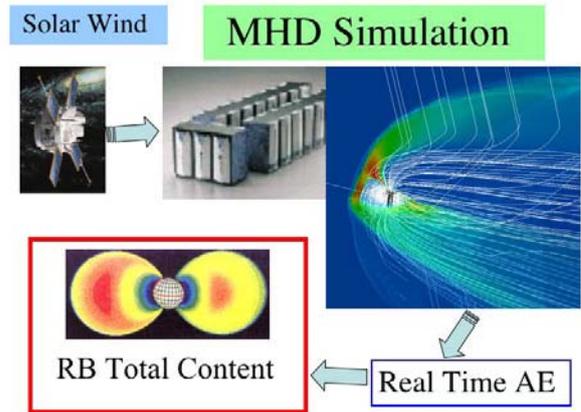


図6、放射線帯電子予報システム

NICTでは、太陽風の観測データを機構
内の大型アンテナを用いて、リアルタイム
に取得し、それを入力として磁気圏のリア
ルタイムシミュレーションを行っている。
出力の一つに、Kp 指数などの磁気活動指
数があり、これは、観測をよく再現してい
る。この指数を積分していくことで、放射
線帯の総電子数が求まることになり、この
領域を飛翔する人工衛星のトータルドーズ
が計算されることになる。

放射線帯のダイナミックモデルは、これ
から取り組んでいかなければならない大
きな課題であり、JAXA, NICT では、大
学の研究者とも連絡をとりながら、進
めている現状である。

References

Freidel, R. H., G. D. Reeves, and T. Obara, Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere - a review -, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 265, 2002

Miyoshi, Y., V. K. Jordanova, A. Morioka, and D. S. Evans, Solar cycle variations of the electron radiation belts: Observations and radial diffusion simulation, *Space Weather*, Vol. 2, S10S02, doi:10.1029/2004SW000070, 2004

Obara, T., M. Den, Y. Miyoshi, and A. Morioka, Energetic electron variation in the outer radiation zone during early May 1998 magnetic storm, *JASTP*, 65, 1407-1412, 2000.

Obara, T., Y. Miyoshi, and A. Morioka, Large enhancement of the outer belt electrons during magnetic storms, *Earth Planets Space*, 53, 1163-1170, 2001.

小原隆博、中村雅夫、電子放射線帯変動における波動の役割、*Space Radiation*, Vol. 4, No. 2, 91, 2004

Obara, T., M. Nakamura, H. Matsumoto, T. Goka, Relativistic electron variation in the outer radiation belt inferred from MDS-1 (Tsubasa) satellite, *Space Radiation*, in press, 2007